

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Katarina Lesičar**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Katarina Lesičar

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Veri Rede na ukazanoj prilici i povjerenju te pomoći i vremenu. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na strpljenju i podršci tijekom studija.

Katarina Lesičar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Katarina Lesičar**

Mat. br.: 0035205587

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Celulozni izolacijski materijali u uljnim transformatorima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cellulosic insulation materials in oil-filled power transformers**

Opis zadatka:

Aktivni dio uljnog transformatora izolira se čvrstom izolacijom i uranja se u transformatorsko ulje - tekuću izolaciju. Materijali koji se koriste u izolacijskom sustavu, mijenjali su se i razvijali paralelno s razvojem transformatora. Danas se za izoliranje dijelova pod naponom najčešće koriste mineralno ulje te papir, tvrdi papir i drvo.

U završnom radu potrebno je dati pregled izolacijskih materijala na bazi celuloze koji se koriste u uljnim transformatorima.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je riješiti problem koji se javlja pri izradi izolacijske barijere za metalne dijelove transformatora. Izolacijska barijera u obliku U-profila izrađuje se savijanjem tvrdog papira (prešpana) u traženi oblik.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadala:

*Rede*

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## Sadržaj:

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO .....</b>	<b>2</b>
2.1. TRANSFORMATOR .....	2
2.1.1 Definicija i način rada .....	2
2.1.2 Podjela transformatora .....	3
2.1.3 Osnovni dijelovi transformatora.....	8
2.2. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA .....	10
2.2.1. Svojstva izolacijskih materijala .....	12
2.2.2. Čvrsta izolacija .....	12
2.2.2.1. Izolacijski papir.....	13
2.2.2.2. Transformatorsko drvo .....	19
2.2.3. Tekuća izolacija.....	20
2.2.3.1. Vrste i svojstva izolacijskih tekućina .....	20
2.2.3.2. Mineralno transformatorsko ulje.....	20
2.2.3.3. Sintetske izolacijske tekućine.....	22
2.2.4. Izolacija namota.....	23
2.2.5. Načini kvara izolacije .....	24
2.2.6. Starenje izolacijskog sustava transformatora .....	25
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>26</b>
3.1. Opis problema .....	28
3.2. Moguća rješenja .....	31
<b>4. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>33</b>
<b>5. LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
PRILOZI.....	37

## Popis slika:

<b>Slika 1.</b> Prikaz jednofaznog transformatora .....	2
<b>Slika 2.</b> Elektroenergetski sustav (trafostanica) .....	3
<b>Slika 3.</b> Transformator snage .....	4
<b>Slika 4.</b> Distributivni transformator .....	5
<b>Slika 5.</b> Specijalni transformator .....	5
<b>Slika 6.</b> Mjerni transformator .....	6
<b>Slika 7.</b> Suhi transformator .....	7
<b>Slika 8.</b> Osnovni dijelovi energetskog transformatora .....	8
<b>Slika 9.</b> Transformatorski lim .....	9
<b>Slika 10.</b> Izolirani aktivni dio transformatora .....	11
<b>Slika 11.</b> Izrada izolacije od papira .....	11
<b>Slika 12.</b> Lanac celuloze .....	13
<b>Slika 13.</b> Mikrostruktura drvene pulpe .....	13
<b>Slika 14.</b> Razni oblici proizvod za izolaciju .....	14
<b>Slika 15.</b> Izolacijski papir u rolama i trakama .....	15
<b>Slika 16.</b> Papir u pločevinama .....	15
<b>Slika 17.</b> Primjer „Kraft“ papira .....	16
<b>Slika 18.</b> Tvrdi papir ili prešpan .....	17
<b>Slika 19.</b> Dijamantni papir .....	18
<b>Slika 20.</b> Laminirano drvo .....	19
<b>Slika 21.</b> Prikaz strujanja trafo-ulja u uljnom transformatoru .....	21
<b>Slika 22.</b> Namoti .....	23
<b>Slika 23.</b> Izolacija trofaznog namota transformatora .....	24
<b>Slika 24.</b> Gotove barijere od tvrdog papira.....	26
<b>Slika 25.</b> Montirana barijera na metalni steznik DT-a .....	27
<b>Slika 26.</b> Hidraulička preša .....	29

<b>Slika 27.</b> Barijera koja ne zadržava oblik .....	29
<b>Slika 28.</b> Magnetna savijalica .....	30
<b>Slika 29.</b> Barijera izrađena s rekonstruiranim alatom .....	31
<b>Slika 30.</b> Dio novo izrađene barijere .....	32

## **Popis tablica:**

<b>Tablica 1.</b> Karakteristike materijala za izradu barijera .....	28
--	----



**Popis oznaka:**

Oznaka	Opis
DP	stupanj polimerizacije
DT	distributivni transformator
$I_1$	izmjenična struja primara
$I_2$	izmjenična struja sekundara
$N_1$	broj zavoja primara
$N_2$	broj zavoja sekundara
NN	namot nižeg napona
RN	regukacijski namot
$U_1$	napon primara
$U_2$	napon sekundara
VN	namot višeg napona

## SAŽETAK

Izolacijski sustav ključni je dio svakog električnog uređaja i stroja. Kod transformatora, izolacijski sustav najčešće čini kombinacija tekućeg izolacijskog medija (mineralno ulje) i čvrste izolacije (papir, tvrdi papir i drvo). U ovom radu dan je pregled izolacijskih materijala na bazi celuloze koji se koriste u uljnim transformatorima.

Drvo i papir su celulozni izolacijski materijali s izrazito dobrim mehaničkim svojstvima, lako se oblikuju u željene proizvode i jednostavno kombiniraju s drugim tekućim ili krutim izolacijskim materijalima. Dostupni su i relativno jeftini, biorazgradivi, netoksični i reciklabilni. S obzirom na sve navedeno, još dugo će biti prvi izbor u sustavu izolacije ulje-papir kod uljnih transformatora.

U eksperimentalnom dijelu rada predložena su moguća rješenja problema koji se javlja pri izradi izolacijske barijere za metalne dijelove transformatora. Izolacijska barijera izrađuje se savijanjem tvrdog papira u traženi oblik. Preveliki elastični povrat i pucanje bridova barijera, što je dovodilo do električnog proboja izolacije, izbjegnuto je promjenom konstrukcije alata čime je postignuta tražena kvaliteta barijera.

**Ključne riječi:** izolacija transformatora, celulozni materijali, mineralno ulje, prešpan

## **SUMMARY**

Insulation system is a key part of every electrical device and machine. Transformer insulation system design usually consists of a combination of a liquid insulating medium (mineral oil) and a solid insulation (paper, hard paper and wood). This paper presents, an overview of the insulating material based on cellulose used in oil transformers.

Wood and paper are cellulosic insulating materials with extremely good mechanical properties, easily shaped into desired products and combined with other liquid or solid insulating material. They are readily available but also relatively cheap, biodegradable, non-toxic and recyclable. In view of the aforesaid, the oil-paper insulation system will be the first choice for oil transformers for quite some time.

The experimental part of the paper deals with the possibilities of finding, a potential solution to the problem that occurs in the preparation of insulation barrier for the metal parts of the transformer. The insulation barrier is made by bending the hard paper into the required shape. Oversized elastic return and cracking of the barrier edges, which lead to the electrical breakdown of the insulation, is prevented by changing the construction of the tool to achieve the desired barrier quality.

**Key words:** insulation transformer, cellulose materials, mineral oil, pressboard

# 1. UVOD

Potreba za električnom energijom u stalnom je porastu zbog mogućnosti njenog prijenosa na velike udaljenosti uz male troškove, učinkovite pretvorbe, te prijenosa i obrade podataka. Elektroenergetski sustav čine proizvodnja, prijenos, distribucija i potrošnja električne energije, a to je ujedno najveći, najrasprostranjeniji i najskuplji tehnički sustav [1]. Temeljnu zadaću ovog sustava čine pouzdana i kvalitetna opskrba električnom energijom. Dijelovi elektroenergetskog sustava međusobno su povezani, pa električne prilike u jednom dijelu utječu na prilike u ostalim dijelovima sustava. Da bi proizvedena električna energija stigla do potrošača u željenom obliku mora proći kroz statički pretvarač, odnosno transformator koji joj mijenja napon iz niže u višu vrijednost. Iz tog razloga transformator predstavlja jedan od najvažnijih dijelova elektroenergetske mreže. Transformator treba biti projektiran tako da izdrži moguća naprezanja kojima je izložen tijekom njegova korištenja. Naprezanja koja se javljaju su mehanička, električna i toplinska. Poseban naglasak stavlja se na pravilno održavanje i zaštitu od kvarova samog transformatora, obzirom na njegovu važnost i visoku cijenu. Svaki neočekivani kvar mogao bi izazvati katastrofalne posljedice, kako u ekonomskom tako i ekološkom smislu. Transformator ima svoj vijek trajanje, a on iznosi oko 40 godina. Kako se u transformatoru, za izoliranje aktivnih dijelova najčešće koriste organski materijali podložni kemijskoj razgradnji, papir na osnovi celuloze i transformatorsko ulje mineralnog podrijetla, vijek trajanja transformatora procjenjuje se upravo na temelju stanja njegove izolacije [2].

Glavni cilj ovog rada bilo je upoznavanje s materijalima korištenim u izolaciji uljnih transformatora, čiji se princip rada nije mijenjao desetljećima, a koriste se već više od 100 godina.

Definiran je i opisan način rada transformatora, prikazani su njegovi osnovni dijelovi i podjela. Detaljnije su navedeni i opisani primjeri krute i tekuće izolacije korištene u izolacijskom sustavu transformatora.

U radu je također opisan problem izrade izolacijske barijere od tvrdog papira (prešpana) za metalne dijelove transformatora, te su navedeni mogući načini njegova rješavanja.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. TRANSFORMATOR

#### 2.1.1 Definicija i način rada [3]

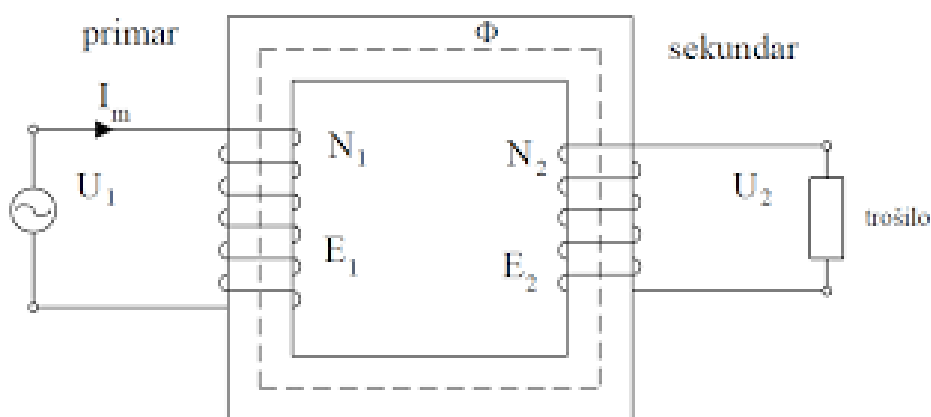
Razvoj transformatora započinje 1831. godine Faradayevim otkrićem elektromagnetske indukcije na čijem se principu zasniva rad svih transformatora.

Transformator je mirujući elektromagnetski uređaj koji na načelu elektromagnetske indukcije pretvara električnu energiju jedne naponske razine u drugu pri istoj frekvenciji. Glavni su mu dijelovi magnetska jezgra i namoti. Transformatori obavljaju različite zadaće u elektroenergetskom sustavu, a najznačajnija je ona kod prijenosa i razdiobe električne energije. Mogu biti izrađeni kao jednofazni ili trofazni.

Jednofazni transformatori imaju dva odvojena namota, primarni i sekundarni sa zajedničkom jezgrom. Na slici 1 shematski je prikazan jednofazni transformator [7].

Primarni namot s  $N_1$  zavoja prima izmjeničnu struju  $I_1$  napona  $U_1$  iz električne mreže ili generatora pri čemu se u željeznoj jezgri inducira promjenjivi magnetski tok. U sekundarnom namotu s  $N_2$  zavoja pobuđuje se izmjenični napon  $U_2$  po pravilima elektromagnetske indukcije. Izmjenični napon  $U_2$  predaje se priključenom trošilu ili mreži kao struja  $I_2$ . Pritom dolazi do transformacije napona, dok snaga struje ostaje približno ista. Budući da nema pokretnih dijelova, sam transformator pokazuje male gubitke.

Jezgru transformatora čini feromagnetski materijal i ona služi za prijenos magnetskog toka iz jednog namota u drugi.



**Slika 1.** Prikaz jednofaznog transformatora

### 2.1.2 Podjela transformatora [2]

Transformatore možemo podijeliti prema namjeni i prema vrsti izolacijskog sustava.

Prema namjeni razlikujemo:

- **energetske transformatore** (u širem smislu transformatori snage)
  - energetske transformatori u užem smislu (energetski, mrežni velikih i srednjih snaga)
  - distribucijski (manjih snaga)
  - specijalni transformatori
- **mjerni transformatori** [4]
  - naponski
  - strujni
  - kombinirani

Na slici 2 prikazan je elektroenergetski sustav čiji osnovni dio čini transformator [8].



**Slika 2.** Elektroenergetski sustav (trafostanica)

**Energetski transformatori** ili transformatori snage koriste se u elektroenergetskom sustavu za prijenos i razdiobu električne energije. Oni su također i generatorski transformatori koji se koriste u elektranama za spajanje generatora i niskonaponske mreže te transformatori i autotransformatori za povezivanje mreža različitih snaga. Ekonomični su, pouzdani i sigurni. Na slici 3 prikazan je transformator snage [9].



**Slika 3.** Transformator snage

**Distribucijski transformatori** izvode se za manje snage i napone. Sastavni su dio distribucijske mreže kojom se električna energija distribuira do potrošača priključenih na distribucijsku mrežu. Slika 4 prikazuje distribucijski transformator [10].



**Slika 4.** Distributivni transformator

*Specijalni transformatori* koriste se za posebne namjene i konstrukcijski su izvedeni drugačije od ostalih, a jedan od njih prikazan je na slici 5 [11]. U specijalne transformatore spadaju transformatori za napajanje željeznice, ispravljački transformatori te, transformatori za rudnike.



**Slika 5.** Specijalni transformator



**Mjerni transformatori** koriste se za izoliranje mjernih i zaštitinih uređaja od visokog napona. Snizuju vrijednosti struje i napona na razinu klasičnih mjernih instrumenata. Slikom 6 prikazan je mjerni transformator [12].



**Slika 6.** Mjerni transformator

Transformatore prema vrsti izolacijskog sustava dijelimo na:

- uljne transformatore
- suhe transformatore

**Uljni transformatori** kao rashladni medij koriste izolacijsku tekućinu prirodnog ili sintetskog porijekla tzv. transformatorsko ulje. Zbog dobrih izolacijskih svojstava ulja i velike specifične topline, transformatori za više napone i velike snage redovito se izrađuju kao uljni. Karakterizira ih niža cijena i velika pouzdanost. Aktivni dio i ulje smješteni su u kotlu gdje se toplina preko stjenki kotla prenosi u okolinu i tako hladi transformator.

**Suhi transformatori** kao rashladni medij u većini slučajeva koriste zrak. Zrak svojim prirodnim strujanjem ili pomoću hladnjaka hladi transformator. Zrak ima lošija izolacijska svojstva i slabije odvodi toplinu nego ulje. Za razliku od ulja zrak nije zapaljiv pa se zrakom hlađeni transformatori koriste tamo gdje je nezapaljivost izrazito važno (brodovi, bolnice, rudnici,...). Na slici 7 prikazan je suhi transformator [11].



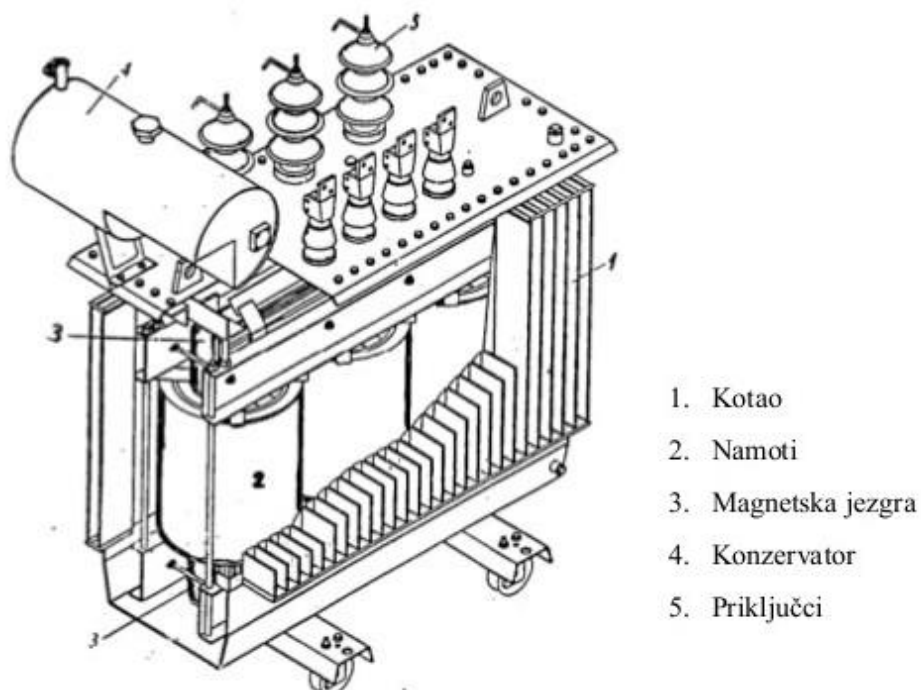
**Slika 7.** Suhi transformator

### 2.1.3 Osnovni dijelovi transformatora

Osnovni dijelovi energetskog transformatora prikazani su na slici 8, a u njih ubrajamo:

- kotao
- feromagnetsku jezgru
- namote
- konzervator
- priključke
- konstrukcijske dijelove

Transformator se sastoji od aktivnih i pasivnih dijelova. Aktivni dio čine jezgra i namoti koji služe za transformaciju električne energije.



**Slika 8.** Osnovni dijelovi energetskog transformatora [13]

- **Kotao** – predstavlja kućište transformatora u koje se ulaže aktivni dio (jezgra s namotima). Stjenke kotla izrađene su od čeličnog lima koji ga hermetički zatvara zbog rashladnog ulja koje se u njemu nalazi [2].
- **Jezgra** – omogućuje stvaranje magnetskog kruga i magnetske indukcije potrebne za prijenos energije s primarnog namota na sekundarni namot. Izrađuje se od željeznih limova tzv. transformatorskih limova koji su prikazani slikom 9 [14]. Limovi se dobivaju toplim ili hladnim valjanjem, a njihovo osnovno svojstvo je velika magnetska vodljivost. Limovi moraju biti izolirani, a kao izolacijski materijal se koristi svileni papir, lak ili vodeno staklo. Dio jezgre na kojem se nalazi namot naziva se stup, a dio koji spaja stupove zove se jaram [3, 4].
- **Namoti** – sačinjeni su od neprekinutog skupa zavoja koji pripadaju strujnom krugu transformatora. Mogu biti niskonaponski (NN), visokonaponski (VN) i regulacijski namoti (RN). U pravilu se izrađuju od elektrotehničkog bakra ili elektrotehničkog aluminija izoliranog papirnatom izolacijom [3].
- **Konzervator** – spremnik dodatnog prostora koji omogućuje širenje transformatorskog ulja uslijed porasta temperature uzrokovane radom transformatora. Nalazi se na vrhu transformatora [4].
- **Priključci** – neizostavan su dio svakog transformatora. Služe kao spojnice između namota transformatora i elektroenergetskog sustava. Funkcija im je provođenje električne struje, izoliranje i odvajanje izolacijskih medija [2].



**Slika 9.** Transformatorski lim

## 2.2. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA

Izolacijski materijali imaju zadaću izolirati električne proizvode i njihove dijelove, što obuhvaća izoliranje vodiča, vodova, namota i raznih konstrukcijskih dijelova. Izoliranje mora biti pouzdano i dugotrajno, a izolacija se mora suprotstaviti svim naprezanjima koja proizlaze iz funkcije proizvoda, kao što su unutarnji utjecaji i utjecaji iz okoline. Istovremeno izolacijski materijali moraju biti tehnološki prikladni i ekonomski opravdani.

Postoji veliki broj izolacijskih materijala različitih svojstava, oblika i agregatnih stanja. Podjela izolacijskih materijala nije laka zbog njihove fizikalne i kemijske raznorodnosti i različitosti primjene.

Na temelju porijekla dijelimo ih na prirodne i umjetne, dok na temelju primjene na čvrste, materijale za omatanje i materijali za ispunjenje prostora između dijelova koji se izoliraju. Najznačajnija podjela je ipak ona na temelju kemijskog sastava na organske i anorganske materijale. Kod izolacije transformatora organski materijali imaju prednost pred anorganskim materijalima.

U organske izolacijske materijale ubrajaju se izolacijske tekućine (izolacijska ulja), smole, elastomeri, plastomeri, vlaknasti materijali i lakovi.

Zbog obavljanja različitih funkcija koje se traže od izolacije u pojedinim uređajima, ugrađuje se veći broj različitih izolacijskih materijala koji čine izolacijski sustav.

Tijekom godina, kao izolacijski materijali kod transformatora, koristili su se različiti celulozni i necelulozni vlaknasti materijali. Najčešće su se koristile pamučne krpe, juta, svila, azbest i mnogih drugi materijali.

Danas se za izoliranje dijelova pod naponom u energetske transformatorima najčešće koristi mineralno ulje i materijali na bazi celuloze - papir, tvrdi papir, drvo. Značajnije karakteristike celuloznih materijala su stabilnost prema kemikalijama, netoksičnost, čvrstoća, biokompatibilnost i hidrofilnost.

Izolacija u transformatoru dijeli se na čvrstu i tekuću. Aktivni dio uljnog transformatora, jezgra i vodiči, izoliran je papirom (čvrstom izolacijom) i uronjen u transformatorsko ulje (tekuća izolacija). Izolacija između namota i prema uzemljenim dijelovima sastoji se od ulja i barijera od prešpana u obliku cilindara i kapa. Na zahtjev korisnika, umjesto mineralnim uljem, transformatori mogu biti punjeni nekim sintetskim izolacijskim tekućinama - sintetičkim esterom ili vegetabilnim uljem [2].

Izolirani aktivni dio transformatora prikazan je na slici 10 [14], a izrada papirne izolacije cilindričnog oblika vidi se na slici 11 [15].



Kao pomoćni izolacijski materijali koriste se guma, lak, smole i drugi materijali.



**Slika 10.** Izoliran aktivni dio transformatora



**Slika 11.** Izrada izolacije od papira

### 2.2.1. Svojstva izolacijskih materijala [2]

Izolacija transformatora izložena je djelovanju povišene temperature, elektromagnetskog polja i katalitičkom utjecaju metala, a to su ujedno i uzroci početka degradacije. Celulozni materijali stabilni su u transformatorskom ulju i imaju izvrsna izolacijska svojstva koja se pojačavaju impregnacijom. Jednostavno ih je oblikovati u kalupe i namatati te su zbog cijene i lake dostupnosti još uvijek najčešće korišten primjer čvrste izolacije.

Materijali koji se koriste u uljnim transformatorima moraju zadovoljavati norme i određene tehničke zahtjeve, kao što su kompatibilnost s uljem i otpornost prema ulju. Najjednostavnije rečeno kompatibilnost je sposobnost funkcioniranja dviju tvari u istom okruženju bez međusobnog ometanja. Materijali koji nisu kompatibilni s transformatorskim uljem slabe fizikalno–kemijska i dielektrična svojstva ulja i indirektno mogu biti uzrok kvarova transformatora. Interakcija između čvrstog materijala i ulja može uzrokovati apsorpciju ulja u materijal, otapanje topljivih tvari iz materijala u ulje te također može dovesti do kemijske reakcije između izolacijskog materijala i ulja.

Dielektrična svojstva papira i ulja ovise o materijalu od kojeg su izrađeni, tehnologiji izrade i stupnju onečišćenosti. Osim toga, vrijeme izloženosti aktivnog dijela zraku nakon sušenja prilikom stabiliziranja namota i utapanja aktivnog dijela u kućište transformatora, negativno utječu na dielektrična svojstva izolacijskih materijala.

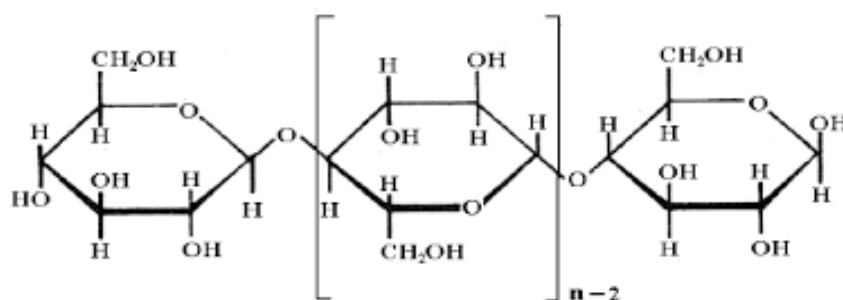
### 2.2.2. Čvrsta izolacija

Čvrstu izolaciju u transformatoru čine celulozni materijali. U njih ubrajamo papir, tvrdi papir i drvo.

Čvrsti izolacijski materijali moraju imati visoku dielektričnu čvrstoću, visoki otpor, dobru toplinsku vodljivost, visoku otpornost na istezanje i smičnu čvrstoću, visoki stupanj toplinske stabilnosti, kemijsku otpornost te otpornost na vlagu, habanje i savijanje [2].

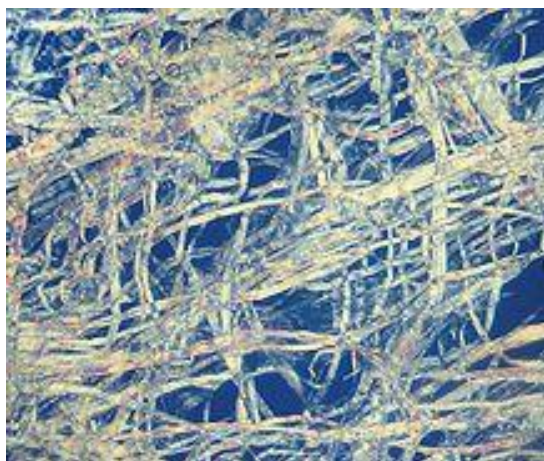
### 2.2.2.1. Izolacijski papir [2]

Čvrsta izolacija energetskih transformatora izrađena je od celuloze. Celuloza je ugljikohidrat, polisaharid čiju strukturu čine molekule glikoze međusobno povezane glikozidnom vezom. Lanac celuloze prikazan je na slici 12 [20]. Makromolekule celuloze sastoje se od dugačkih paralelnih lanaca međusobno povezanih vodikovim vezama. Tako povezane makromolekule formiraju celulozna vlakna. Čvrstoća vlakana ovisi o stupnju polimerizacije (DP). Stupanj polimerizacije je mjera za dužinu lanca makromolekule celuloze i pokazatelj je mehaničkih svojstava papirne izolacije.



**Slika 12.** Lanac celuloze

Za proizvodnju izolacijskog papira koristi se neizbjeljivana drvena pulpa kemijski obrađena sulfatnim ili Kraft procesom. Slika 13 prikazuje mikrostrukturu drvene pulpe [21]. Ulazna sirovina za proizvodnju izolacijskog papira je drvo (najčešće bukovina). Papir predstavlja proizvod najčešće kratkih vlakana drvene celuloze. Papir na bazi celuloze ima nisku toplinsku postojanost i jako je higroskopan. Kvaliteta samog papira ovisi o dužini vlakana i tehnološkom postupku dobivanja.



**Slika 13.** Mikrostruktura drvene pulpe



Papir se kao izolacijski materijal upotrebljava za slojne izolacije, izolaciju namota i kabela te kao izolacijski umetak između transformatorskih limova i kao nosivi materijal za prešane laminare.

Kako se izolacijski papir korišten u izolaciji transformatora nalazi u ulju, mora biti kemijski čist i porozan kako bi što bolje upijao ulje. Spajanjem većeg broja još mekih papira proizvodi se karton. Od papira koji je impregniran smolama prešanjem se proizvode slojeviti izolacijski proizvodi poput ploča, cilindara, cijevi te razni drugi proizvodi, kako je prikazano na slici 14 [22].

Jedna od bitnih karakteristika kod izolacijskog papira je njegova niska cijena u odnosu na druge materijale.



**Slika 14.** Razni oblici proizvod za izolaciju

**Papir u rolama** je papir koji se koristi za omatanje vodiča, a razlikujemo:

- „Kraft“ papir
- papir poboljšanih toplinskih svojstava
- kalandrirani ili satinirani papir

Na slici 15 prikazani su različiti oblici papira u rolama [23].



**Slika 15.** Izolacijski papir u rolama i trakama

**Papir u pločevinama**, prikazan slikom 16 [24], možemo podijeliti na:

- tvrdi papir ili prešpan
- formabilni tvrdi papir



**Slika 16.** Papir u pločevinama

„**Kraft**“ **papir** prikazan na slici 17 [26], dobiva se prešanjem neizbjeljivane pulpe u jednoslojne listove koji se suše. Na kraju procesa listovi se mogu formirati u role ili gužvati u tzv. krep-papir. Vlažni listovi papira mogu se slagati u više slojeva i prešati pri čemu nastaje višeslojni papir.



**Slika 17.** Primjer „Kraft“ papira

**Papir poboljšanih toplinskih svojstava** ima veću otpornost na oksidaciju i povišenu temperaturu. Dobiva se dodavanjem različitih aditiva u pulpu prije procesa prešanja. Aditivi onemogućuju stvaranje vode tijekom starenja papira. Za poboljšanje mehaničkih i električnih svojstava može se impregnirati različitim smolama.

**Kalandrirani ili satinirani papir** ima povećanu gustoću, a dobiva se hladnim prešanjem vlažne pulpe. Zatim slijedi sušenje listova u kontinuiranoj peći bez pritiska, nakon čega se listovi dodatno prešaju vrućom prešom.

**Transformatorski papir** mora biti izrazito gladak, zgusnut i kemijski čist. Upotrebljava se za izolaciju vodiča u namotima transformatora i za izradu nosača svitaka transformatora, naročito kod transformatora hlađenih uljem.

**Tvrđi papir ili prešpan** (eng. *pressboard*, *transformerboard*) dobiva se prešanjem mokre drvene pulpe u kalupe na debljinu od 0,3 mm do 0,8 mm. Na početku procesa dobivanja iz pulpe se istiskuje voda, a nakon toga slijedi proces sušenja bez pritiska na sadržaj vlage ne veći od 5 %. Ovako dobiveni tvrdi papir ima izuzetna mehanička svojstva, otporan je na savijanje i zadržava svoj oblik još dugo godina.

Zbog toga što se nalazi u ulju mora biti porozan i kemijski čist da ne dođe do zagađenja ulja i mora imati minimalne promjene dimanzija prilikom upijanja ulja. Prešpan je gušći i manje savitljiv u usporedbi s drugim korištenim papirima. Kako bi se postigle veće debljine, pojedinačne ploče tvrdog papira se međusobno slojevito lijepe smolama. Jednolike je debljine i vrlo glatke površine. Prema namjeni se dijeli na strojni, utorski, transformatorski i kondenzatorski. Prešpan je još poznat i pod nazivom izolacijski karton.

Na slici 18 vidi se tvrdi papir ili prešpan [27].



**Slika 18.** Tvrdi papir ili prešpan

**Transformerboard** sastavlja se od vrlo tankih slojeva transformatorskog prešpana velike čvrstoće i finih vlakana. Dobro se impregnira u transformatorsko ulje.

**Formabilni tvrdi papir** dobiva se istim postupkom kao i tvrdi papir do faze sušenja na sadržaj vlage 5 %. Dobivene ploče dalje se koriste za proizvodnju oblikovanih komponenata za transformatore kao što su kape, prstenovi za stezanje, cilindri i mnoge druge potrebne komponente.

**Laminirani prešpan** nastaje spajanjem visokokvalitetnih komprimiranih izolacijskih ploča od celuloze visoke kemijske čistoće i toplinske stabilnosti. Debljine variraju od 9 mm do 120 mm. Razlikujemo laminirani prešpan s kazeinom i poliestrom. U ovom slučaju kazein je ljepilo na bazi vode s dobrom propusnošću transformatorskog ulja. Laminirani prešpan s poliestrom ima najveću mehaničku čvrstoću. Primjenjuje se u transformatorima kao pomoćni materijal.

**Dijamantni papir (DPP)** izrađuje se od kraft papira premazanog epoksidnom smolom zagrijanom iznad temperature taljenja. Epoksidno ljepilo nanosi se na papir u obliku dijamantnog uzorka na određenim udaljenostima. Koristi se za međuslojnu izolaciju namota kako bi se povećala otpornost namota na kratki spoj. Zahtjeva odgovarajući termički tretman kako bi se izvela polimerizacija smole unutar papira čime se slojevi međusobno zalijepe i učvrste namot izolacije u kompaktnu cijelinu [28]. Na taj način postižu se poboljšana svojstva. Uzorak dijamantnog papira vidi se na slici 19 [29].



**Slika 19.** Dijamantni papir

#### 2.2.2.2. Transformatorsko drvo

Drvo se smatra jednim od prvih tehničkih materijala koji su se koristili. Njegova primjena imala je veliki značaj u razvoju, tehničkom i ekonomskom napretku. Kao tehnički materijal ima jedinstvena i posebna svojstva.

Drvo je prirodan, heterogen, anizotropan kompozitni materijal s izrazito visokom specifičnom čvrstoćom i specifičnom krutošću. U potpunosti je reciklabilan i ekološki visokovrijedan. Tehničko drvo primjenjuje se u suhom stanju. Izrazito je higroskopan materijal, upija vlagu iz zraka. S promjenom količine vlage u drvu mijenjaju se njegove dimenzije, gustoća, mehanička, toplinska i druga svojstva. Drvo je sirovina iz koje se mogu dobiti celuloza i papir [30].

U izolacijskom sustavu transformatora drvo predstavlja pomoćni izolacijski materijal.

**Transformatorsko drvo** predstavlja zgušćeno laminirano drvo koje se koristi u izradi konstrukcijskih dijelova transformatora. Laminirano drvo za transformatore proizvodi se lijepljenjem furnira iz bukovine. Slojevi furnira međusobno se lijepe sintetskom smolom tlačenjem na visokoj temperaturi. Takvo laminirano drvo karakteriziraju dobra izolacijska svojstva, dobra apsorpcija ulja, odlična mehanička otpornost i otpornost na temperaturu, habanje i abraziju te mala specifična težina. Slojevi se slažu i lijepe poprečno, paralelno ili tangencijalno, epoksidnim ili fenol-formaldehidnim smolama [2]. Na slici 20 prikazano je laminirano drvo [31].



**Slika 20.** Laminirano drvo

### 2.2.3. Tekuća izolacija

Tekući dielektrici ili poznatiji kao izolacijske tekućine dio su grupe elektroizolacijskih materijala koji se koriste u električnim uređajima za proizvodnju, prijenos, distribuciju i industrijsku primjenu električne energije. Dielektrik se smatra izolatorom zato što je to tvar ili medij kroz koji električno polje prolazi, ali sam ne vodi električni naboj. Njihova primjena proizlazi iz njihovih fizikalno–kemijskih i dielektričnih svojstava. Karakterizira ih dobra sposobnost tečenja u širokom temperaturnom području, dobro odvođenje topline te elektroizolacijska svojstva i kompatibilnost s drugim materijalima i okolinom.

#### 2.2.3.1. *Vrste i svojstva izolacijskih tekućina* [32]

Izolacijske tekućine prema porijeklu dijelimo na prirodne i sintetske. Približno 90% dielektričnih tekućina čine transformatorska ulja mineralnog porijekla, a ostalo su sintetske tekućine u specijalnim transformatorima, prekidačima, kondenzatorima, provodnicima te električnim uređajima. Ulje osigurava siguran rad tijekom radnog vijeka transformatora. Transformatorско ulje ima dvije svrhe, a to je električna izolacija i hlađenje transformatora.

#### 2.2.3.2. *Mineralno transformatorsko ulje*

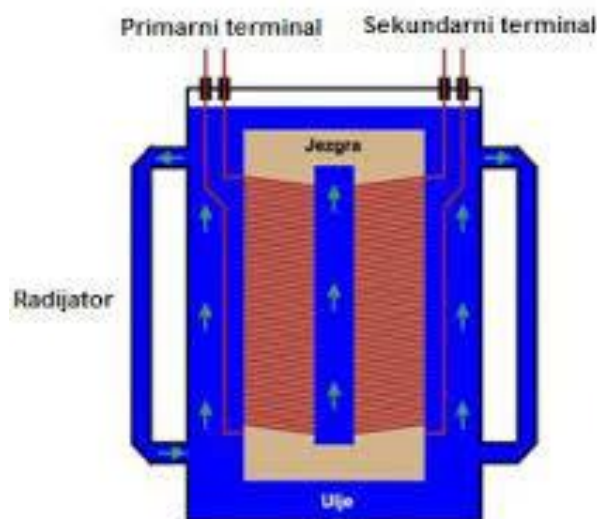
Transformatorsko ulje mora zadovoljavati određene standarde za električna, fizikalna, kemijska i toplinska svojstva kako bi se moglo koristiti u predviđene svrhe. Mineralna transformatorska ulja su visoko rafinirana ulja dobivena iz sirove nafte.

Glavna zadaća mu je električna izolacija odnosno izoliranje aktivnih dijelova transformatora i prijenos topline, a ostale funkcije su gašenje električnog luka koji se javlja na krajevima regulatora napona i sprječavanje iskrenja. Mineralna ulja stabilna su na visokim temperaturama. Kompleksnog su kemijskog sastava, a predstavljaju mješavinu različitih ugljikovodika.

Prema sastavu se dijele na dva tipa: parafinska i naftenska. Uz gore navedene karakteristike transformatorsko ulje pojačava izolacijska svojstva papirnoj izolaciji, a sama kvaliteta ulja ovisi o vrsti sirove nafte. Voda je najopasnije i najčešće onečišćenje u transformatorskim uljima, a kod transformatora u pogonu nastaje kao produkt starenja izolacijskog materijala.

Ulje predstavlja slabiju komponentu u izolacijskom sustavu papir-ulje, u pogledu električne otpornosti. Transformatorsko ulje mora imati dobru oksidacijsku stabilnost koja osigurava dug rad na visokim temperaturama, temperaturnu vodljivost, viskoznost koja osigurava dobru cirkulaciju oko komponenata, te nisku točku tečenja. Mala viskoznost omogućava da ulje prodiere u čvrstu izolaciju i prenosi toplinu s jezgre prema hladnjacima pa na taj način služi kao i sredstvo za hlađenje.

Strujanje ulja u transformatoru predloženo je na slici 21 [33].



**Slika 21.** Prikaz strujanja trafo-ulja u uljnom transformatoru

Nekada se kao zamjena za mineralna ulja koristio **Askarel** (PCB). Askarel je sintetička stabilna tekućina niske zapaljivosti i izvrsnih izolacijskih svojstava. U prisustvu električnog luka može doći do raspadanja i formiranja štetnih i otrovnih čestica koje mogu biti i kancerogene. Zbog velikog onečišćenja okoliša njegova uporaba je zabranjena za punjenje transformatora i drugih uređaja [34].



### 2.2.3.3. Sintetske izolacijske tekućine [32]

Sintetske izolacijske tekućine koriste se u trenutku kada se zahtijevaju nezapaljivost, termička stabilnost i visoka dielektrična svojstva. U ovo skupinu izolacijskih tekućina spadaju: sintetski organski esteri, silikonska i vegetabilna ulja (bilnog porijekla), te razni ugljikovodici.

#### **Silikonski organski esteri**

Esteri su organski spojevi koji nastaju reakcijom kiseline i alkohola uz izdvajanje vode, a sastoje se od ugljika, vodika i kisika. Spadaju u kategoriju teško zapaljivih rashladnih i izolacijskih medija. Primjena i proizvodnja estera za transformatore novijeg je datuma. Takvo transformatorsko ulje dobiveno je kemijskom sintezom. To su uljaste tekućine bez mirisa, nešto gušći i viskozniiji od mineralnog ulja, manjeg afiniteta na vlagu i veće toplinske postojanosti te utječu na produljenje radnog vijeka transformatora. Karakterizira ih dobra biološka razgradivost, što znači da su ekološki prihvatljivi.

#### **Silikonsko ulje**

Silikonsko ulje karakterizira slaba zapaljivost, bolja otpornost na oksidaciju i termička stabilnost u odnosu na mineralno ulje, što dozvoljava neprekidni rad na temperaturi do 160 °C. Teško su biorazgradiva.

#### **Vegetabilna ulja**

Vegetabilna ulja su prirodni esteri koji se dobivaju iz sjemenki različitih poljoprivrednih kultura kao što su suncokret, uljana repica, soja te ricinus. Glavna prednost im je to što su biorazgradivi i netoksični te samim time potpuno ekološki prihvatljivi.

#### 2.2.4. Izolacija namota

Namoti moraju biti izolirani međusobno, prema jezgri i prema konstrukciji. Izolacija mora biti dimenzionirana za napon koji određuju propisi. Izvodi se kombinacijom slojeva papira i slojeva ulja [37].

Za izolaciju vodiča od kojih se izrađuju namoti koristi se lak, prešpan, pamuk, natron-papir, stakleno ili sintetičko predivo. Namoti nižeg i višeg napona također moraju biti međusobno izolirani.

Postoje četiri načina namotavanja namota u transformatorima, a to su pločasti namot, slojeviti namot, spiralni (helični) namot i namot u obliku diska. Slika 22 prikazuje namote za jezgru transformatora [14].



**Slika 22.** Namoti

Izolacija pojedinih namota prema stupu i jarmu jezgre postiže se pomoću cilindara od papira ili prešpana te izolacijskih umetaka od papira, drva ili nekog drugog izolacijskog materijala.

Izolacija trofaznog namota transformatora prikazana je slikom 23 [15].



**Slika 23.** Izolacija trofaznog namota transformatora

#### 2.2.5. Načini kvara izolacije

Proboj izolacije može nastati kao kvar uslijed prekomjernih dielektričnih gubitaka i kao kvar uslijed prenaponskih naprežanja. Dielektrični gubici rezultat su oslabljenja izolacije ili onečišćenja izolacije tvarima kao što je voda. Prenaponska naprežanja nastaju kada je napon narinut na izolator veći od maksimalnog dozvoljenog napona određen za tu izolaciju te dolazi do slabljenja njegovih dielektričnih svojstava. Neki uzroci kvara uslijed prenaponskog naprežanja su vanjsko povećanje narinutog napona, smanjenje debljine izolacije, zračni mjehurići ili raspori u izolaciji.

## 2.2.6. Starenje izolacijskog sustava transformatora [2]

U trenutku kada započne eksploatacija transformatora započinje i proces starenja njegovog izolacijskog sustava. Uslijed naprezanja koja se javljaju u transformatoru dolazi do starenja odnosno razgradnje papira i ulja pri čemu slabe dielektrična svojstva izolacije. Poznavanje mehanizama razgradnje transformatorskih materijala i pritom nastalih produkata razgradnje važno je za dijagnostiku i otkrivanje pogrešaka te provođenja odgovarajućih postupaka održavanja transformatora.

Pri razgranji celulozne izolacije može biti prisutno nekoliko mehanizama, a to su:

- hidroliza
- oksidacija
- piroliza.

Temperaturno starenje celulozne izolacije uzrokuje slabljenje mehaničkih svojstava. Produkti starenja ulja ubrzavaju proces degradacije celuloze i obrnuto. Zbog pucanja polimernih lanaca između molekula celuloze, papir gubi izolacijska svojstva, a ulju se nastankom vode i plinova pogoršavaju izolacijska svojstva. Sniženje prekidne čvrstoće papira na 50 % početne vrijednosti smatra se krajem papirne izolacije.

Postoje razne električne i kemijske metode kojima se može analizirati stanje transformatora, odnosno stanje njegova izolacijska sustava. Na taj način moguće je prijevremeno otklanjanje pogrešaka i izbjegavanje troškova zbog kvara. Također, primjenom nekih od metoda obnove uljno-papirne izolacije proces starenja se može usporiti.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Barijera je pozicija koja služi izolaciji metalnog steznika, odnosno sprječava preskakanje iskre između steznika i drugih metalnih dijelova (jezgra, izvodi). Za izradu steznika koriste se standardni čelični U-profilirani širine 50, 65, 80, 100, 120 i 140 mm.

Barijera mora potpuno prekriti steznik i čvrsto prijanjati uz njegovu površinu. Njezin oblik, dimenzije i izolacijska svojstva trebaju ostati nepromijenjeni kroz cijeli radni vijek transformatora. Barijere se najčešće izrađuju od tvrdog papira poznatijeg pod nazivom prešpan.

Na slici 24 vide se izrađene barijere spremne za montažu na metalne steznike, a na slici 25 prikazana je barijera montirana na metalni steznik transformatora.



**Slika 24.** Gotove barijere od tvrdog papira



**Slika 25.** Montirana barijera na metalni steznik DT-a

### 3.1. OPIS PROBLEMA

Kod proizvodnje barijera za steznike distributivnih transformatora javlja se problem savijanja prešpana. Nakon savijanja tvrdog papira u preši, barijera ne zadržava postignuti oblik. Zbog elastičnog povrata njezine stranice ne ostaju pod postignutim kutom, što otežava montažu i uzrokuje kasnije probleme u eksploataciji.

Podaci o materijalu korištenim za izradu barijera navedeni su u Tablici 1 [38]. Korišten materijal poznat je pod trgovačim nazivom *Transformerboarda T IV* (proizvođač Weidmann).

**Tablica 1.** Karakteristike materijala za izradu barijera

Tip	B 3.1.A
Prividna gustoća	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Debljina	1,0-8,0 mm
Sadržaj vlage	< 6 %
Površina	Izbrazdana, nekalandrirana
Sirovina	Nebijeljena sulfatna pulpa crnogorice
Postupak	Priprema sirovine, oblikovanje ploča, kvašenje, vruće prešanje, rezanje
Primjena	Trake, cilindri, ploče, nosači
Posebnosti	Vrlo ravan materijal, visoka mehanička i električna čvrstoća, malo skupljanje

Barijere se proizvode na hidrauličnoj preši. Ploča prešpana određenih dimenzija navlaži se i savije u preši, pri čemu se koristi žig i matrica pravokutnog oblika, kako bi barijera poprimila oblik U-profila. Slikom 26 prikazana je jedna od mogućih izvedbi hidrauličke preše [39].



**Slika 26.** Hidraulička preša

Zbog elastičnog povrata, barijera ne zadržava željeni oblik kako je prikazano slikom 27.



**Slika 27.** Barijera koja ne zadržava oblik



Prilikom montaže na steznik, barijera se ručno prilagodi obliku steznika. Kako se radi o relativno krutom materijalu, ovakvo savijanje “na suho” uzrokuje pucanje na savijenim rubovima barijera. U velikom broju slučajeva to ne uzrokuje problem, ali javljaju se slučajevi kad takvo oštećenje barijere stvara probleme. Barijere s manjim oštećenjima ispituju se u ispitnoj stanici, pa ako ne dođe do električnog proboja ostaju u primjeni. Ako se električni proboj dogodi, takvi proizvodi se odbacuju.

Kako bi se osiguralo zadržavanje oblika, kao privremeno rješenje, proizvodnja svih U-profila prebačena je na ručnu magnetnu savijalicu.

Magnetna savijalica prikazana je na slici 28 [40].



**Slika 28.** Magnetna savijalica

Kako je magnetna savijalica ručni alat s čestim zastoјima u radu, takav način proizvodnje je sporiji i zahtijeva više fizičkog rada. Također postoji mogućnost ozbiljnijeg zastoја u proizvodnji ukoliko na savijalici dođe do kvara.

Iz tog razloga, potrebno je razmotriti alternativni pristup ovom problemu.

### 3.2. MOGUĆA RJEŠENJA

Navedeni problem moguće je riješiti na nekoliko načina:

- uvođenje novog materijala za barijere (upotreba materijala s manjim elastičnim povratom)
- nabava nove savijalice koja ne bi bila na ručni pogon
- rekonstrukcija žiga i matrice s drugačijim skošenjem i zaobljenjem, kako bi se omogućilo savijanje malo preko 90°, čime materijal ostaje trajno savijen u oblik U-profila. Pri tome treba voditi računa da se izbjegnu oštri rubovi i moguća mjesta koncentracije naprezanja.

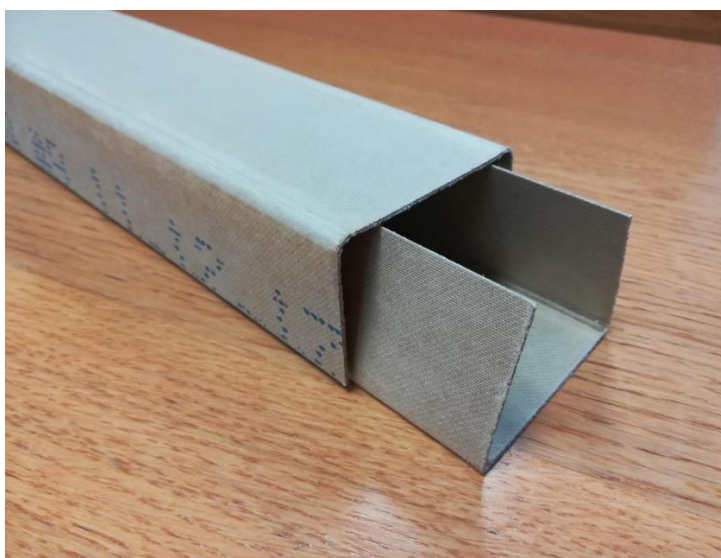
Uvođenje novog materijal i nabava nove savijalice oduzimalo je previše vremena te samim time i novaca.

Novi materijal, odnosno upotreba materijala s manjim elastičnim povratom ne garantira da će se spriječiti nastanak mogućeg problema električne prirode.

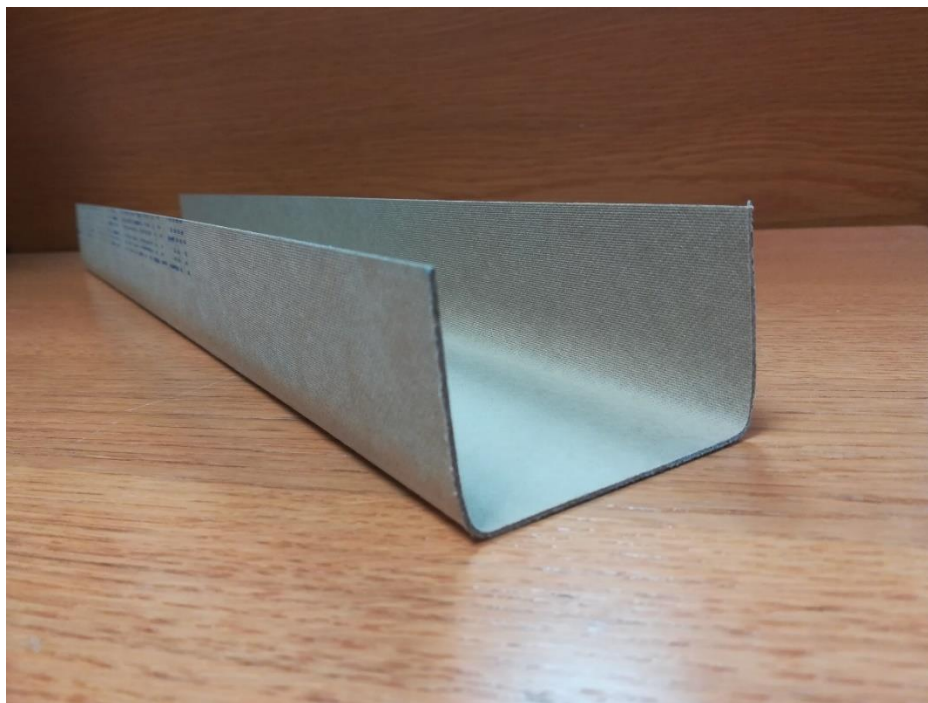
U ovom slučaju izabrano je zadnje rješenje te je izvedena rekonstrukcija žiga i matrice. Zbog potrebe za efikasnijom proizvodnjom transformatora ono je bilo najbrže i cijenom najprihvatljivije. Rekonstruirani žig i matrica izrađuju se iz drva, lako dostupnog materijala.

Barijere koje su oblikovane s novim žigom i matricom imale su potreban oblik i dimenzije, a pri montiranju se nisu pojavljivale pukotine na bridovima barijera.

Na slikama 29 i 30 prikazane su barijere izrađene s rekonstruiranim alatom.



**Slika 29.** Barijera izrađena s rekonstruiranim alatom



**Slika 30.** Dio novo izrađene barijere

## 4. ZAKLJUČAK

Pouzdan prijenos električne energije ovisi o sigurnom radu izolacijskog sustava transformatora. Za njegov dugoročan i siguran rad potrebni su dobro postavljeni kriteriji dimenzioniranja, izbor optimalnih materijala i visoka kvaliteta proizvodnje komponenti sustava.

Energetski transformatori mogu sadržavati 10 i više tona papirne izolacije i preko 100 tona transformatorskog ulja. Normalna radna temperatura je od 60 °C do 90 °C. Vijek trajanja kod navedenih radnih uvjeta može biti do 40 godina [2].

Vijek trajanja transformatora ovisi o stanju njegovog izolacijskog sustava ulje-papir, a prije svega o papirnoj izolaciji koja nepovratno stari i nije ju moguće regenerirati. Transformatorsko ulje može se tijekom eksploatacije zamijeniti.

Brzina procesa starenja varira, a ovisi o materijalima, izradi i uvjetima eksploatacije. Starenje izolacije ubrzano je prisustvom kisika i vlage. Na temelju prethodno navedenih obilježja može se zaključiti, kako je životni vijek trajanja transformatora jednak trajanju njegove papirne izolacije.

Uzimajući u obzir cijeli raspon svojstva celuloznih materijala, moguća je proizvodnja raznih oblika te proizvoda. Celulozni materijali dostupni su u svakom trenutku i cijenom prihvatljivi velikom broju populacije na tržištu. Drvo je glavni izvor celuloze iz kojeg je relativno jednostavno moguće dobiti papir. Drvo i papir su vlaknasti izolacijski materijali koji imaju izrazito dobra mehanička svojstva, lako se oblikuju u željene proizvode i jednostavno kombiniraju s drugim tekućim ili krutim izolacijskim materijalima.

U današnje vrijeme kada je zaštita okoliša na listi prioriteta jako visoko rangirana, materijali na bazi celuloze, a u ovom slučaju su to papir i drvo, prihvatljivi su u svakom pogledu. Potpuno biorazgradivi, netoksični, otporni prema raznim tekućinama, a ujedno zadovoljavajućih svojstava u pogledu područja primjene mogu se i moći će se koristiti još dugi niz godina. Papir je moguće reciklirati, a drvo se u svakom slučaju može u potpunosti iskoristiti.

Kako je vidljivo iz eksperimentalnog dijela, celulozni kao i svi ostali materijali, mogu imati neke nedostatke. U ovom slučaju to je bilo pucanje rubova izolacijskih barijera od prešpana te njihov preveliki elastični povrat što je prouzročilo probleme električne prirode. Promjenom karakteristika alata izbjegnuti su navedeni problemi i postignuta je tražena kvaliteta barijera.

Izolacijski materijali na bazi celuloze primjenjuje se u transformatorima već dugi niz godina i obzirom na njihova izrazito dobra svojstva, nema potrebe da u budućnosti budu zamijenjeni nekim drugim materijalima.

## 5. LITERATURA

- [1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektroenergetski\\_sustav](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektroenergetski_sustav)
- [2] D. Vrsaljko, Razgradnja čvrste izolacije transformatora u laboratorijskim uvjetima starenja, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2012.
- [3] B. Skalicki i J. Grilec: "Električni strojevi i pogoni", FSB, Zagreb, 2011.
- [4] Z. Varga: "Električni strojevi i uređaji", Zagreb, 2009.
- [5] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator>
- [6] A. Dolenc, Transformatori I i II, Elektrotehnički fakultet, Zagreb
- [7] A. Pečarić, Nadomjesni modeli energetskih transformatora, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2016.
- [8] <http://www.poslovni.hr/promo/abb-uspjesno-zavrsio-izgradnju-trafostanice-ts-11020-kv-vostane-244353>
- [9] <http://ba.transformer-xy.org/transformer/oil-transformer/110kv-or-1000kv-high-voltage-power.html>
- [10] <http://minel-rs.blogspot.com/2015/08/distributivni-transformatori.html>
- [11] <http://www.koncar-dst.hr/news/Photogallery>
- [12] [http://www.koncar-mjt.hr/en/news\\_and\\_media/photo\\_gallery](http://www.koncar-mjt.hr/en/news_and_media/photo_gallery)
- [13] URL:<https://docplayer.gr/39310381-Transformatori-tr-1-princip-rada-prazni-hod-gubici-korisnost-matematicki-model-nadomjesna-shema-i-fazorski-dijagram.html>
- [14] <https://www.slideshare.net/ivanfilip/fabrika-transformatora-slovenija-57135064>
- [15] [http://www.radosevic.hr/radosevic\\_aktualno.html](http://www.radosevic.hr/radosevic_aktualno.html)
- [16] Pantić D., Karneluti. J., Radosavljević, R., Obnova sustava uljno-papirne izolacije – Regeneracija transformatorskih ulja, 20. International Electrical Engineering Symposium, Šibenik, Hrvatska, 2010.
- [17] Srednji energetski transformatori, Končar katalog
- [18] [http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki\\_materijali.pdf](http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki_materijali.pdf)
- [19] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=11174>

- [20] T. J. Nikolić, Dobivanje biološki aktivnih vlakana na bazi selektivno oksidirane celuloze, Doktorska disertacija, Sveučilište u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2011.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulp\\_\(paper\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulp_(paper))
- [22] <https://www.enpay.com/>
- [23] <https://www.krempel-group.com/produkte/rollenpressspan-tafelpressspan/>
- [24] <https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/insulation-components-and-materials/pressboard/pre-compressed-pressboards>
- [25] <https://www.weidmann-electrical.com/insulation-technology/paper/cellulose-paper/>
- [26] M. Benić, Modifikacija celuloznog papira za transformatore, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015.
- [27] <https://tehnemark.rs/index.php/zaptivni-materijali/prespan>
- [28] S. Carević, M. Mikulić, I. Radić, I. Sitar, Distributivni transformator 400 kVA punjen vegetabilnim uljem, 3. (9.) savjetovanje CIRED, Sveti Martin na Muri, 13.-16.5.2012.
- [29] [https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-sale-ddp-insulating-paper-and\\_60802930119.html?spm=a2700.7724857.normalList.81.75fa4530NFoIAo](https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-sale-ddp-insulating-paper-and_60802930119.html?spm=a2700.7724857.normalList.81.75fa4530NFoIAo)
- [30] V. Rede, Drvo – tehnički materijal, FSB, Zagreb, 1987.
- [31] <http://drvene-konstrukcije.hr/proizvodni-program/lijepljeno-lamelirano-drvo/>
- [32] B. Musulin, Ekološki aspekt korištenja i odlaganja transformatorskih ulja, 4. savjetovanje CIGRÉ, Cavtat, 17.-21.10.1999.
- [33] L. Lovreškov, I. Mršić, Optimiranje procesa pripreme nanofluida na osnovi transformatorskog ulja, Rad za Rektorovu nagradu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.
- [34] <https://steemit.com/askarel/@majidvx/oil-information-askarel>
- [35] I. Radić, A. Mareković, I. Sitar, B. Domitrović, Izolacijski materijali više toplinske klase, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 8.-12.11.2009.
- [36] S. Čabrac, D. Puklek, M. Poljak, Kompatibilnost materijala u transformatorima punjeni mineralnim uljem, 6. savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 9.-13.11.2003., D1 – 02

[37] R. Žičkar, Optimiranje u projektiranju industrijskih transformatora, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.

[38] Weidmann Electrical Technology, katalog

[39] <https://www.mile-x.com/norco-78077-50-ton-usa-air-hydraulic-press-13-25-stroke/>

[40] <https://www.trick-tools.com/Baileigh-4-foot-Magnetic-Box-Pan-Brake-16-gauge-BB-4816M-5616>

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**